

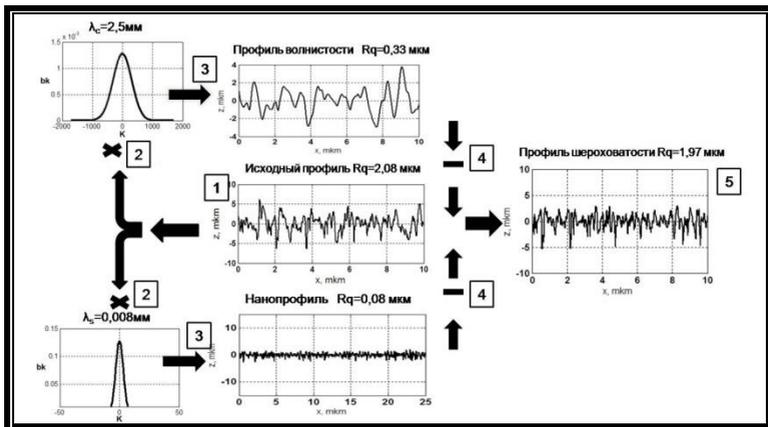


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**В.К. Белов**  
**Е.В. Губарев**

## ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2D-ПАРАМЕТРОВ МИКРОТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве практикума*



Магнитогорск  
2017

**Рецензенты:**

Доцент кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «ЧелГУ»,  
кандидат физико-математических наук

**М.А. Загребин**

Заведующий кафедрой технологий обработки материалов  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

доктор технических наук

**М.В. Чукин**

**Белов В.К.**

**Физика поверхности. Определение 2D параметров микротопографии поверхности** [Электронный ресурс] : практикум / Валерий Константинович Белов, Евгений Владимирович Губарев ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Изд. 2-е, подгот. по печ. изд. 2016 г. – Электрон. текстовые дан. (1,74 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBMPC, любой, более 1GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Приведён лабораторный практикум одному из разделов физики поверхности - «Микротопография поверхности». В данном практикуме с помощью различных портативных профилометров Hommel Etamic W5, TR-200, MARSURF-PS1 и среды MATLAB обучающиеся определяют различные 2D параметры микротопографии поверхности, выполняют ряд заданий и оформляют результаты измерений в виде протоколов. В указаниях изложены последовательность выполнения экспериментов, методика обработки результатов, список литературы. Также в ведении к лабораторным работам дан краткий обзор необходимых теоретических сведений. Терминология данных указаний соответствует современным международным и отечественным стандартам.

Предназначен для обучающихся по направлениям 12.03.01 «Приборостроение», 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 22.03.02 «Металлургия», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.04 «Управление в технических системах», изучающих дисциплины «метрология» и «Специальные главы физики», а также для обучения в НИЦ «Микротопография» МГТУ.

УДК 538.971(075)

© Белов В.К., Губарев Е.В., 2016

© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>4</b>
<b>Лабораторная работа №1</b> Определение параметров шероховатости с помощью профилометра Hommel Etamic W5.....	<b>5</b>
<b>Лабораторная работа №2</b> Определение параметров шероховатости с помощью профилометра TR-200 при фиксированных значениях длинноволновой границы фильтра Гаусса .....	<b>23</b>
<b>Лабораторная работа №3</b> Определение оптимального числа измерений параметров шероховатости на поверхностях с различным видом обработки.....	<b>32</b>
<b>Лабораторная работа №4</b> Определение функциональных характеристик профилей шероховатости с помощью профилометра MARSURF-PS1 в среде MATLAB.....	<b>35</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	<b>44</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> .....	<b>46</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</b> .....	<b>47</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой различной выпускаемой продукции является топография поверхности (surfacetopography). Топография реальной поверхности промышленной продукции в настоящее время характеризуется следующими понятиями:

1. форма поверхности (form);
2. рельеф поверхности (lay);
3. волнистость поверхности (waviness);
4. шероховатость поверхности (roughness);
5. нано поверхности.

Структура поверхности, включающая рельеф, волнистость, шероховатость называют текстурой поверхности (texture).

От параметров текстуры поверхности зависит огромное количество эксплуатационных характеристик поверхности, среди которых:

- 1) трение и износ;
- 2) контактные деформации;
- 3) концентрация напряжений у свариваемых деталей;
- 4) ударная прочность;
- 5) обтекаемость жидкостями и газами;
- 6) герметичность и прочность соединений;
- 7) запыляемость поверхности;
- 8) свариваемость поверхностей;
- 9) адгезия покрытий;
- 10) электропроводимость соединений;
- 11) магнитные свойства;
- 12) отражение и поглощение электромагнитных волн;
- 13) теплопроводность и радиационные свойства;
- 14) коррозия, адсорбция;
- 15) смачиваемость;
- 16) электролизация;
- 17) эмиссия электронов и т.д.

Поэтому технологам и инженерам для осознанного проектирования производств с оптимальными вышеуказанными эксплуатационными характеристиками поверхности необходимы знания характеристик текстуры поверхности, а также аппаратуры и методики их определения [1-16].

Технические характеристики профилометров Hommel Etamic W5, TR-200, MARSURF-PS1 и графическое обозначение шероховатости относительно направления обработки приведены в приложении 1,2.

# Лабораторная работа №1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРОФИЛОМЕТРА HOMMEL ETAMIC W5

### Цель работы:

- получить навыки работы с приборами измерения шероховатости
- оформление протокола, анализ результатов измерений

### 1.1 Общие сведения

Профилем [18-21,23,24] реальной поверхности называется линия пересечения этой поверхности плоскостью, перпендикулярной к ней (рис. 1.1).

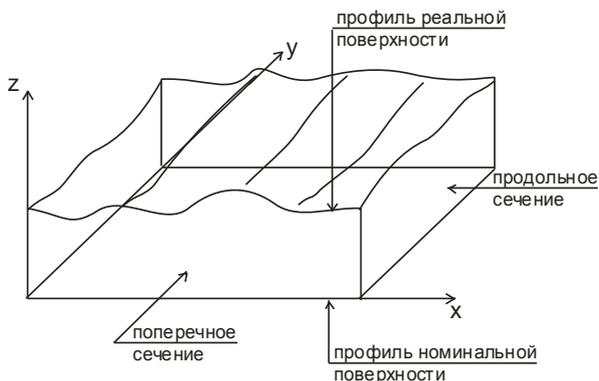


Рис. 1.1. Профили поверхности

Если поверхность имеет явно выраженную анизотропию поверхности, то сечение поверхности, перпендикулярной направлению неровности называют ПОПЕРЕЧНЫМ сечением, а сечение плоскостью, параллельным направлению неровностей - ПРОДОЛЬНЫМ сечением поверхности.

Сразу дать определения профиля формы, профиля волнистости, профиля шероховатости и нанопрофиля сделать невозможно, поскольку эти профили выделяются из измеренного профиля достаточно сложным способом.

Это важнейшее понятия, при определении параметров и функций, характеризующее микротопографию поверхности. Первичная поверхность не тождественна исходной реальной поверхности, поскольку в процессе измерения происходят преобразования поверхности. Эти преобразования обусловлены как самим процессом измерения (радиус иглы стилусного профилометра, наличие скида), так и осознанным удобным представлением профиля (шаг дискретизации, учёт макроформы поверхности).

Прежде чем начнётся анализ микрофотографии поверхности необходимо из измеренной микрофотографии поверхности исключить форму поверхности и мелкие несущественные неровности поверхности ].

Ниже кратко будет рассмотрены эти операции исключения.

### 1.1.1 Исключение формы поверхности

Инженерами придуман оригинальный способ исключения формы – скид (рис. 1.2).

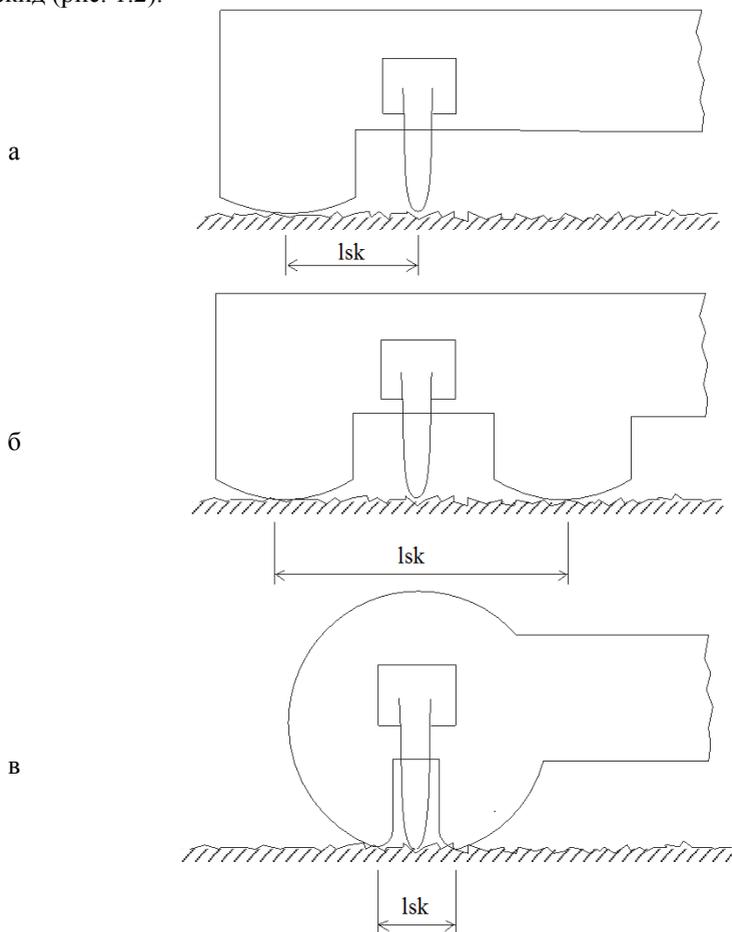


Рис. 1.2. Типы скидов:

а – скид с фазовым сдвигом; б – скид с компенсацией фазового сдвига;  
в – скид с компенсацией фазового сдвига

Наиболее близким по смыслу переводом слова "skid" является "башмак для торможения вагонов". И действительно эта опора для фиксации положения датчика относительно поверхности очень похожа на это приспособление. Это важнейший конструктивный элемент всех портативных профилометров, который определяет положение щупа профилометра относительно измеряемой поверхности. Для измерения шероховатости используют скиды различных типов (см. рис. 1.2). Профилометр регистрирует положение щупа относительно этого скида, то есть базовой поверхностью является поверхность самой измеряемой детали, контактирующая со скидом. Заметим, что игла со скидом не способна измерять волнистость и крупные неровности поверхности. Таким образом, скид автоматически исключает форму поверхности при измерения текстуры поверхности.

Параметрами скида будут являться:

1.  $r_{sk}$  – радиус кривизны поверхности скида;
2.  $l_{sk}$  – расстояние между крайними точками касания скида с поверхностью.

Для скида на рис. 1.2.а характерно то, что вертикальные перемещения иглы и перемещения скида не согласованы по фазе. В случае конструкции скида, изображенного на рис. 1.2 б,в, данные фазовые искажения не исключаются, но как бы перемешиваются.

### 1.1.2 Исключение мелких неровностей поверхности

#### 1.1.2.1 Шаги дискретизации

Величина шага дискретизации  $d$  (рис. 1.3) должна удовлетворять двум противоположным требованиям. С одной стороны  $d_x$  должно быть максимально большим, чтобы получить максимально большую длину оценки  $L$ , но это может привести к искажениям представления профиля. Малые же значения  $d$  приводят к избыточной информации, что сказывается на времени обработки массива ординат.

Значения  $d$  не должны превышать значений (maximum sampling spacing)  $d = [0,5, 1,5, 5]$  мкм для соответствующих стандартных значений радиусов иглы профилометра и длинноволновых границ фильтра шероховатости  $\lambda_s$ , о которых будет сказано ниже.

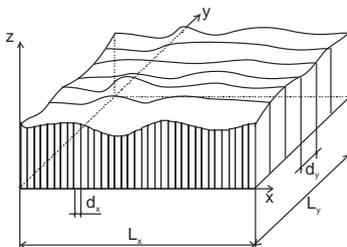


Рис. 1.3. К определению  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $L_x$ ,  $L_y$

### 1.1.2.2 Радиус иглы профилометра

Стилусные профилометры сканируют неровности поверхности щупом (stylus). Щуп имеет вид иглы, радиус конца которой  $r_{\text{tip}}$  имеет стандартные размеры (ISO5436-1 2000)  $r_{\text{tip}} = [2, 5, 10]$  мкм.

Очевидно, что игла конечного радиуса перемещаясь по шероховатой поверхности регистрирует более гладкую поверхность, нежели исходная реальная поверхность. Однако не следует преувеличивать этот эффект, поскольку угол наклона неровностей большинства современных инженерных поверхностей не превышает 5-15°.

Профилограммы профилей обычно изображаются в масштабах, где различие горизонтальных и вертикальных масштабов составляет три порядка. Только при таких масштабах профили поверхности представляют резко ломаные линии. В одинаковом же масштабе линия профиля близка к прямой. Поэтому щупы стандартного набора радиусов ( $r_{\text{tip}} = 2; 5; 10$  мкм) не оказывает существенного влияния на точность определения амплитудных параметров профиля. Таким образом, для регламентации процесса определения амплитудных параметров часто нет необходимости фиксации радиуса щупа у стандартных профилометров.

Но для регламентации частотных параметров указание радиуса и типа щупа обязательно. Если рассматривать щуп как коротковолновый фильтр с отсечкой шага  $\lambda$ , то он будет иметь место сильная зависимость частотного параметра (числа пиков на 1 см длины  $-P_c$ ) от  $\lambda$ . Только достаточно жёсткая регламентация радиуса щупа может обеспечить одинаковые условия измерения частотных параметров.

### 1.1.2.3 Исключение мелких неровностей поверхности с помощью коротковолнового фильтра Гаусса $\lambda_s$

Несколько причин заставило метрологов внимательно отнестись к данному виду фильтрации коротковолновой составляющей поверхности, поскольку надо было разработать единые требования к процессу регистрации ординаты поверхности для оптического и стилусного способа, то есть создать единую систему фильтров коротковолновой составляющей профиля.

Это было сделано стандартизацией весовых функций фильтра Гаусса [11, 18, 21, 22, 24, 25] с набором нижних границ полос пропускания  $\lambda_s$  (roughness shot - wavelength):  $\lambda_s = [2, 5, 8, 25]$  [мкм].

Следует обратить внимание на размерность  $\lambda_s$  в мкм.

Весовая функция этого фильтра  $S_s$  строго стандартизована и имеет вид

$$S_s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_s} \exp \left[ -\pi \left( \frac{x}{\alpha \lambda_s} \right)^2 \right], \text{ где } \alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697$$

Соответствующие ей весовые коэффициенты  $b_k$  для цифровой обработки сигналов выражаются как

$$\hat{b}_k = \exp \left[ -\pi \left( \frac{d_x \cdot k}{\alpha \lambda_s} \right)^2 \right]$$

$$b_k = \frac{\hat{b}_k}{\sum_{k=-p}^{+p} \hat{b}_k}$$

где  $2p+1$  – порядок фильтра, то есть при  $k > p$  значения  $b_k$ , близки к нулю. Данные весовые функции представлены на рис. 1.4.

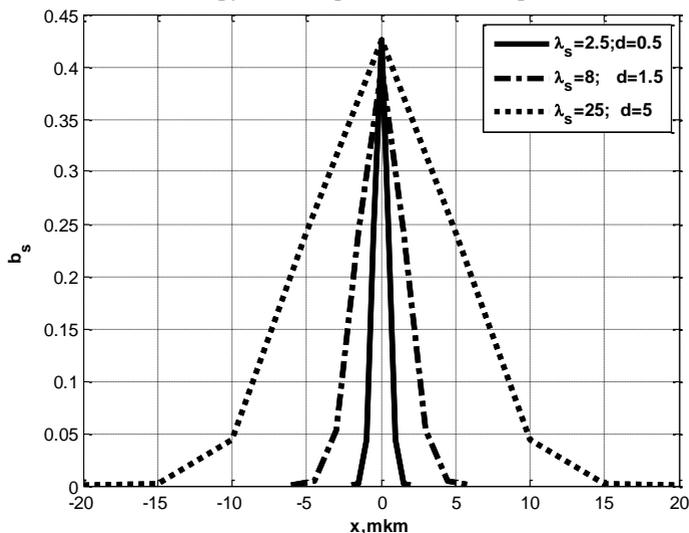


Рис. 1.4. Коэффициенты весовых функций коротковолнового фильтра при стандартных значениях  $\lambda_s$  и  $d$  в мкм.

Практика показывает, что фильтр Гаусса с параметрами  $\lambda_s$  более ”мощно” усредняет рядом расположенные ординаты профиля, нежели фильтр, обусловленный конечными значениями радиуса щупа.

Это указывает на то, что можно пренебречь влиянием радиуса щупа при использовании коротко-волнового фильтра Гаусса  $\lambda_s$  при измерении амплитудных параметров.

Но ещё раз заметим, что использование этого коротковолнового фильтра Гаусса будет оказывать малое влияние на величину измеряемых амплитудных параметров профиля инженерных поверхностей, но при определении частотных параметров профиля нужно обязательно учиты-

вать его влияние и указывать параметр фильтра  $\lambda_s$  при приведении результатов измерения.

### 1.1.3 Первичная поверхность, первичный профиль

Если из измеренной поверхности исключить форму поверхности (точнее первичную математическую модель) и исключит мелкие неровности поверхности, то получим первичную поверхность.

Первичных профилей три. Для получения первичных профилей (индекс **P**) по стандарту необходимо жёстко придерживаться следующего набора параметров регистрации (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Набор параметров регистрации **P** профиля

	1	2	3
$\lambda_s$ , МКМ	2.5	8	25
$r_{tip}$ , МКМ	2	5	10
$d_x$ , МКМ	0.5	1.5	5

Очевидно, что набор 1 используется при регистрации гладких поверхностей, набор 3 – при регистрации очень грубых поверхностей.

На рис. 1.5 показана последовательность операций при получении **P** – профиля.

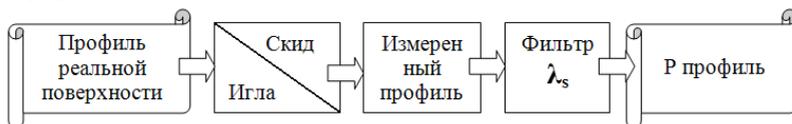


Рис. 1.5. Схема получения **P** профиля на стилусном профилометре

**P** -профиль является исходным профилем для его дальнейшего разделения на профиль шероховатости и профиль волнистости и для определения стандартных параметров и функций этих профилей.

### 1.1.4 Профиль шероховатости, профиль волнистости (*Roughness profile, Waviness profile*)

С помощью стандартных фильтров из **P** профиля [11, 18, 21, 22, 24, 25] выделяются профиль шероховатости (индекс **R**) и профиль волнистости (индекс **W**). Чаще всего для этих целей используются фильтры Гаусса вида (3,4,5), но с другими значениями  $\lambda$ . Это полосовые фильтры имеющие пять наборов с жёстко регламентированным сочетанием нижних и верхних границ полосы пропускания.

Для выделения профиля шероховатости **R** стандартизировано 5 фильтров, параметры которых представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Набор параметров 5 фильтров для выделения **R** профилей

Набор	1	2	3	4	5
$d_x$ , МКМ	0.5	0.5	0.5	1.5	5
$\lambda_s$ , МКМ	2.5	2.5	2.5	8	25
$\lambda_c$ , МКМ	80	250	800	2500	8000
$L$ , МКМ	400	1250	4000	12500	40000

Здесь  $\lambda_s$  коротковолновая граница фильтра, а  $\lambda_c$  длинноволновая граница фильтра выделения **R** профиля из **P** профиля.

Амплитудные характеристики **R** профилей будут существенно зависеть от параметра фильтра  $\lambda_c$ , и практически не будут зависеть от параметра фильтра  $\lambda_s$ .

При графическом изображении границ 5 полосовых фильтров, выделяющих **R** профили (см. рис. 1.6), видно, что коротковолновые границы фильтра  $\lambda_s$  настолько малы, что не видны на рисунке. Но ещё раз напомним (см. раздел 1.2), что при регламентации частотных параметров именно эти коротковолновые границы фильтра будет иметь влияние на определяемые значения частотных параметров профиля.

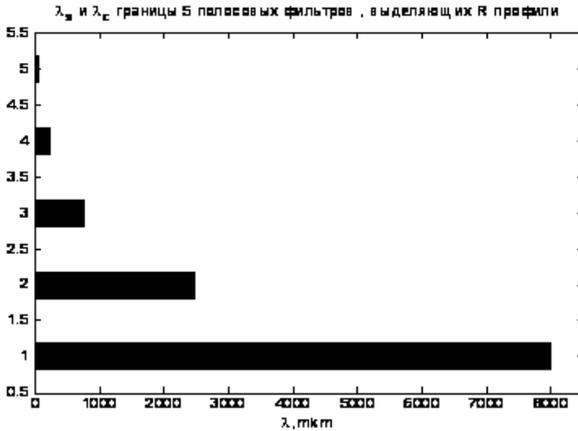


Рис. 1.6. Графическое изображение границ 5 полосовых фильтров, выделяющего **R** профили

Операция **выделения профиля шероховатости** осуществляется следующим образом:

1. Вектор значений ординат  $Z = [Z_1 Z_2 \dots Z_N]$  сворачивается с вектором значений весовых коэффициентов  $b_k$  при параметре фильтра  $\lambda_s$ . Из полученного вектора значений ординат  $\tilde{z}$  вырезают центральную часть, но

такого же размера, что и  $z$ . С помощью этих операций из профиля исключается коротковолновая составляющая профиля шероховатости.

2. Вектор значений ординат  $z = [z_1 z_2 \dots z_N]$  сворачивается с вектором значений весовых коэффициентов  $b_k$  при параметре фильтра  $\lambda_c$ . Из полученного вектора значений ординат  $\dot{z}$  вырезают центральную часть, но такого же размера, что и  $z$ .

3. Из вектора значений  $\dot{z}$  вычитают вектор  $\ddot{z}$ . С помощью 2 и 3 операции из профиля исключается длинноволновая составляющая профиля шероховатости.

Полученный профиль называют **профилем шероховатости** или **R-профилем**.

Структура операций выделения профиля шероховатости представлена на рис. 1.7.

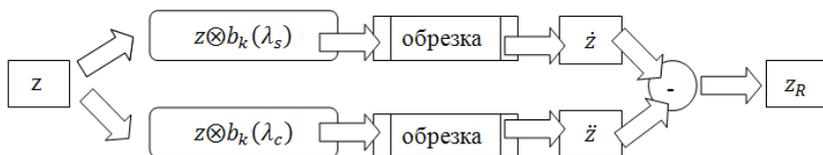


Рис. 1.7. Операции при выделении профиля R

Операция **выделения профиля волнистости** или **W профиля** осуществляется подобным образом, но с другими параметрами фильтра.

### 1.1.5 Рельеф поверхности

Выбор места и направления измерения профиля на измеряемой поверхности является важным пунктом согласования совместных ТУ потребителя и заказчика. Практически всегда (в случае 2D) схемы направление трасс выбирается перпендикулярно направлению рисок поверхности, то есть в направлении максимальных значений параметра  $R_c$ . Именно в этом направлении чаще всего будет выполняться условие фильтрации  $\lambda \leq \lambda_c$  (см. лабораторную работу №2) В направлении же рисок это условие будет чаще нарушаться, поскольку в этом направлении будут большие значения  $\lambda$ . Именно эти обстоятельства вызывают отличия параметров  $R_q$  (и  $R_a$ ), определённых по этим взаимно перпендикулярным направлениям. Эти отличия обусловлены различием режимов фильтрации и никаким образом не могут характеризовать коэффициент анизотропии поверхности.

### 1.1.6 Параметры P, R, W профилей

В этом разделе дадим определения амплитудных и частотных параметров P, R, W профилей, которые регистрируются на портативных профилометрах.

### 1.1.6.1 Амплитудные параметры P, R, W профилей

Совсем недавно микротопографии поверхности детали характеризовали только амплитудным параметром Ra. Часто даже не указывалось значение  $\lambda_c$ , при котором производили измерения Ra.

Более жёсткая регламентация процессов фильтрации измеренного профиля привело к созданию и утверждению стандарта ISO 4287:1997, где были введены определения P, R, W профилей (см. рис. 1.8).

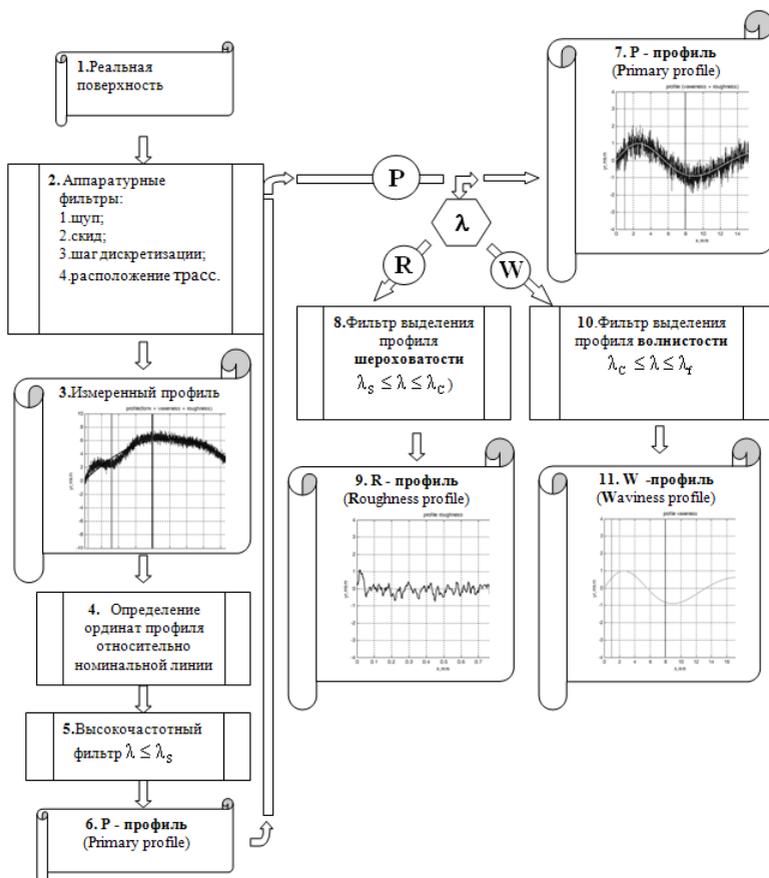


Рис. 1.8. Схема выделения P, R, W профиля из измеренного профиля поверхности

Теперь параметры P, R, W профилей определялись по одинаковым формулам, но в них использовались ординаты соответствующих P, R, W профилей  $z = \{z_p, z_r, z_w\}$ .

Например, среднее арифметическое отклонение определяется как

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i,$$

среднее квадратическое отклонение как

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i)^2},$$

коэффициент асимметрии для R профиля

$$Rsk = \frac{1}{Rq^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i)^3}$$

Для иллюстрации данных определений параметров рассмотрим один из фрагментов профиля шероховатости поверхности автолиста (см. рис. 1.9), определённого при  $\lambda_c=0.8\text{мм}$ . Заметим, что при определении данных параметров происходит усреднение большого количества ординат профиля, что, как известно, резко уменьшает дисперсию этих величин.

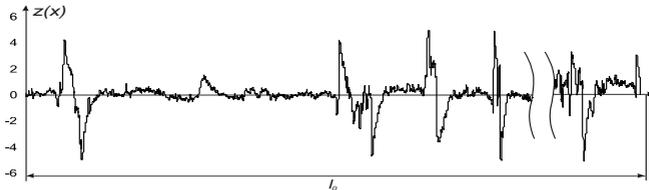


Рис. 1.9. Исходный профиль шероховатости

При определении параметра  $R_a$  суммируются абсолютные значения ординат профиля шероховатости (см. рис. 1.10). Целесообразно сравнить рис. 1.9 и рис. 1.10.

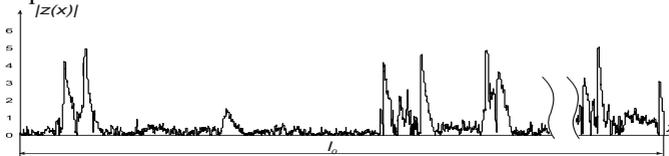


Рис. 1.10. Массив данных для определения параметра  $R_a$

*Достоинства параметра  $R_a$ :*

- 1) большой объём выборки ординат профиля;
- 2) малое влияние отдельных резко выпадающих значений ординат;
- 3) обладает высокой эффективностью по сравнению с другими вышесотными параметрами;

- 4) очень простая электронная схема прибора для оценки этого параметра.

*Недостатки:*

- 1) смешивает информацию о выступах и впадинах профиля;
- 2) не является типовым статистическим параметром распределения;
- 3) малая чувствительность к наличию рисок обработки на поверхности.

При определении параметра  $R_q$  суммируются квадраты значений ординат профиля (см.рис. 1.11). Целесообразно сравнить рис. 1.9 и рис. 1.11.

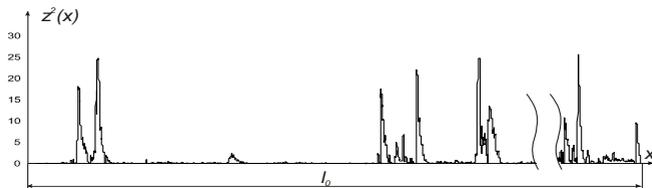


Рис. 1.11. Массив данных для определения параметра  $R_q$

*Достоинства:*

- 1) большой объём выборки ординат профиля;
- 2) чувствительность к наличию рисок обработки на поверхности;
- 3) обладает высокой эффективностью (как и параметр  $R_a$ ) по сравнению с другими высотными параметрами;
- 4) является типовым статистическим параметром распределения, называемый средним квадратическим отклонением выборки, характеризующий ширину гистограммы распределения ординат профиля;
- 5) это одна из основных характеристик спектральных функций профиля.

*Недостатки:*

- 1) смешивает информацию о выступах и впадинах профиля;
- 2) имеет несколько большую дисперсию, нежели параметр  $R_a$ .

При определении параметра  $R_{sk}$  суммируются кубы значений ординат профиля (см. рис.1.12) Целесообразно сравнить рис. 1.9 и рис.1.12.

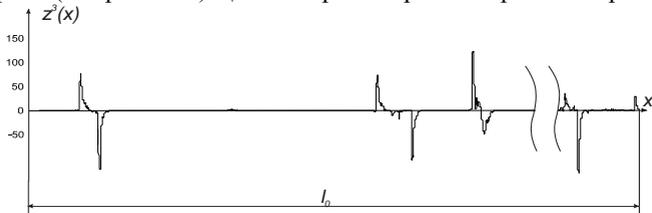


Рис. 1.12. Массив данных для определения параметра  $R_{sk}$

*Достоинства:*

- 1) большой объём выборки ординат профиля ;
- 2) является типовым статистическим параметром распределения, называемый коэффициентом асимметрии и характеризующий несимметричность гистограммы распределения ординат профиля относительно среднего значения;
- 3) чувствителен к различию топографии выступов и впадин.

*Недостатки:*

- 1) имеет большую дисперсию, нежели параметр  $R_q$  .
- 2) обладает низкой эффективностью по сравнению с другими вы-  
сотными параметрами  $R_a$  и  $R_q$ ;

Все вышерассмотренные эти амплитудные параметры не содержат никакой информации о частотных параметрах профиля шероховатости.

### 1.1.6.2 Частотные параметры R профилей

Средний шаг неровностей определяется как

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_s)_i$$

где  $(x_s)_i$  - шаг одной неровности, то есть расстояние между двумя соседними точками пересечения профилем средней линии сверху вниз (см.рис. 1.13);

$N_{Sm}$  – число шагов профиля.

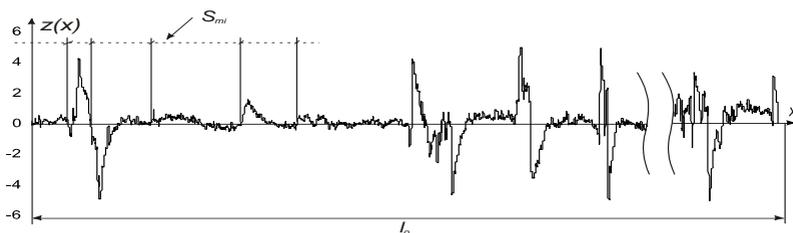


Рис. 1.13. Массив данных для определения параметров  $S_m$

*Достоинств нет.*

*Недостатки:*

- 1) это очень неудачная попытка вести детерминированный параметр для профиля шероховатости, который является практически всегда случайным процессом.
- 2) дисперсия этого параметра огромна по сравнению с  $(S_m)^2$ .

Данный параметр с особой осторожностью можно использовать для характеристики периодического профиля шероховатости, если такой вдруг обнаружится.

Чтобы хоть каким то образом характеризовать частотные параметры профиля шероховатой поверхности по SEP 1940 был введён эмпирический параметр  $RP_c$  [26,27] с регламентируемыми значениями уровней  $c_1=+0.5$  мкм,  $c_2=-0.5$  мкм. Он оказался достаточно удачным для частотной характеристики шероховатости поверхности.

Назовём выступом профиля его элемент, выше уровня  $c_1$ , а впадиной – элемент профиля ниже уровня  $c_2$ . Рядом расположенные выступ и впадину назовем пиком профиля. Параметр  $P_c$  показывает число пиков поверхности на 1 см профиля (см.рис. 1.14).

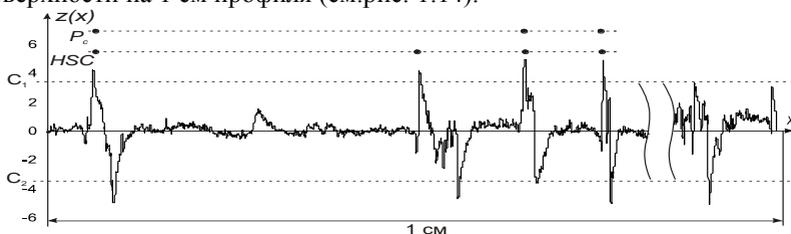


Рис. 1.14. Массив данных для определения параметров  $P_c$

Стандарт DINEN 10049 [27]определил параметр  $RP_c$ , как число неровностей, которые имеют последовательно части выше и ниже заданных уровней  $c_1$  и  $c_2$  на 1 см R профиля.

*Достоинства:*

- 1)чёткое определение выступа и впадины,
- 2)появляется возможность построения графиков зависимости  $P_c=f(C)$  при  $C=C_1=C_2$ ;
- 3)в случае  $c_1=c_2=0$  получаем  $RP_c \cong \frac{1}{R_{sm}}$

*Недостатки:*

- 1)подобные величины описываются распределением Пуассона, то есть среднее значение  $P_c$  соизмеримо с его дисперсией;
- 2) здесь опять делается попытка вести детерминированный параметр для профиля шероховатости, который практически всегда является случайным процессом.

Например, заказчики автолиста в настоящее время требуют продукцию с наибольшим числом пиков и параметр  $RP_c$  должен превышать значения 50 1/см при  $\lambda_c=2.5$ мм. Для производства лицевых деталей автомобиля  $RP_c$  должен превышать значения 70, а в некоторых случаях 100 и 120 1/см.

## 1.2. Описание портативного профилометра Hommel Etamic W5

Перед началом измерения необходимо произвести настройку прибора (рис. 1.15). Для этого необходимо удерживая прибор на весу (без соприкосновения щупа «1» с какой-либо поверхностью) включить нажа-

тием кнопки «2». Выбрав с помощью колеса «5» иконку программы измерения «7», войти в настройки этой программы нажатием кнопки «6». В появившемся окне (см.рис. 1.16) необходимо активировать программу измерения нажатием кнопки «6». После чего будут доступны изменения настройки данной программы. На рисунке 1.17 показано меню настроек измерительной программы. Для выполнения лабораторной работы нам необходимы разделы меню «Параметры» и «Условия измерения».

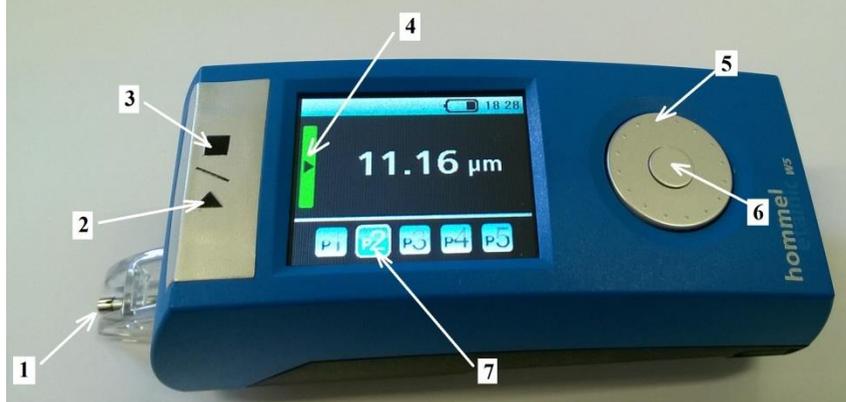


Рис. 1.15. Внешний вид прибора для контроля шероховатости Hommel Etamic W5

- 1- Измерительный шуп с защитным кожухом;
- 2- Кнопка включения прибора, а также старта измерения;
- 3- Кнопка выключения прибора, а также выхода из меню настроек;
- 4- Графическое отображение позиции положения наконечника щупа;
- 5- Колесо прокрутки для выбора настроек измерения;
- 6- Кнопка подтверждения выбора настроек измерения;
- 7- Иконки настроек программ измерения.

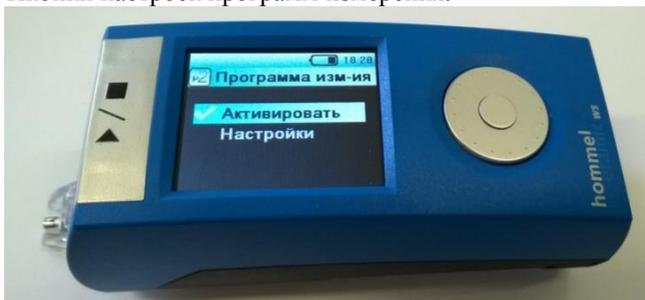


Рис. 1.16. Активация программы измерения

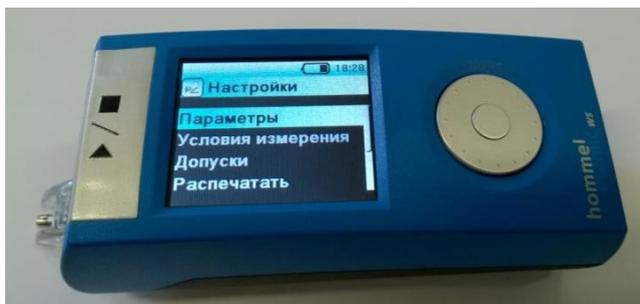


Рис. 1.17. Меню настроек измерительной программы

После выбора раздела меню «Параметры», на дисплее появится список параметров (см. рис. 1.18) шероховатости доступный для анализа на приборе HommelEtamic W5 (см. приложение 1). Выбор параметров производится прокруткой колеса «5» и подтверждением выбора нажатием кнопки «6». После выбора параметров нажатием кнопки 3 возвращаемся в основное меню настроек измерительной программы (см. рис.11.8).



Рис. 1.18. Выбор параметров шероховатости

Раздел меню «Условия измерения» (см.рис. 1.19) устанавливает:

- длину трассы  $l_t$ , мм: 1.5, 4,8, 15.0,  $n \cdot l_c$ ;
- скорость перемещения шупа во время измерения  $v_t$ , мм/с: 0.15, 0.5, 1.0;
- длинноволновая граница фильтра  $l_c$ , мм: 0.25, 0.8, 2.5;
- применение коротко волновой фильтрации  $l_c/l_s$ : выкл., 30, 100, 300;
- фильтр: ISO 11562;
- выбор единиц измерения:  $\mu\text{m}$  (микрометр),  $\mu\text{in}$  (микродюйм);
- C1/C2 - установки уровней для параметра R<sub>Pc</sub>: 5%, Rz, Ra/2, значения;
- R<sub>m</sub>, мкм - установка уровня для параметра R<sub>m</sub>, мкм/%: мкм, %, средняя линия.



Рис. 1.19. Выбор установок процесса измерения

Перед началом измерения необходимо проверить поверхность на наличие дефектов, загрязнений, а также правильность установки положения прибора на образце (см. рис. 1.20). Если рекомендации, показанные на рис.1.20 были выполнены, индикатор позиции положения щупа 4 будет отображаться зеленым цветом. При превышении предела измерения щупа, индикатор загорится красным цветом. В этом случае необходимо подобрать более плоский участок образца либо обратиться к преподавателю.

Общие замечания:

1. Измеряемая поверхность и прибор не должны перемещаться во время измерения. Необходимо избегать касания образца или прибора руками.
2. Длина измеряемой поверхности больше чем длина трассы.
3. Располагать прибор таким образом, чтобы его корпус был параллелен измеряемой поверхности.
4. Избегайте любых механических воздействий на щуп.
5. Очистите измеряемую поверхность от грязи, воды, смазки и т.п. предварительно протерев её мягкой салфеткой смоченной спиртом.

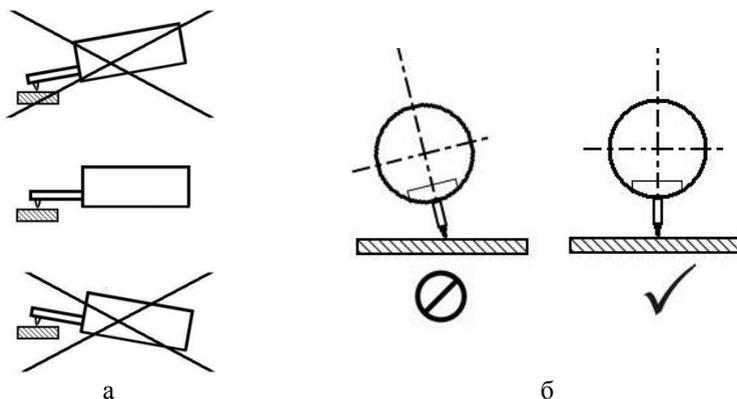


Рис. 1.20. Положение (а) прибора и (б) измерительного щупа при установки на образец

### 1.3. Определение параметров шероховатости образцов по взаимно перпендикулярным трассам

**Задание:** Определить параметры шероховатости трёх образцов по взаимно перпендикулярным трассам

#### Порядок выполнения работы

1. Включите прибор нажатием клавиши «2» (далее см. рис. 1.21).

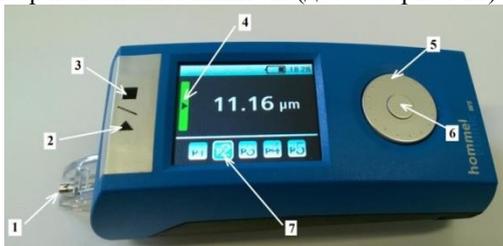


Рис. 1.21. Прибор Hommel Etamic W5

2. Нажатием клавиши «6» войдите в меню настроек прибора. В разделе меню «Параметры» выберите параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_{Pc}$ . Подтвердите выбор нажатием клавиши «3».
3. Вращением колеса «5» выберите в разделе «Условия измерения»:  
 $l_t = 15.0$  мм;  
 $v_t = 1.0$  мм/с  
 $l_c = 2.5$  мм;  
 $l_c/l_s = 300$   
фильтр: ISO 11562;  
единицы измерения:  $\mu\text{m}$   
 $C1/C2$ : значения  $C1=0.5$  мкм,  $C2=-0.5$  мкм.  
Подтвердите выбранные настройки нажатием клавиши «3».
4. Установите прибор на измеряемую поверхность. Направление перемещения щупа «1» должно быть перпендикулярно линиям рисок на поверхности. Следуя рекомендациям рисунка 1.20 добиться, чтобы индикатор позиции положения наконечника щупа «4» находился в зеленой области.
5. Произведите измерение нажатием клавиши «2». Полученные результаты занесите в таблицу протокола.
6. Осуществите 5 измерений в различных областях поверхности образца.
7. Повторите данные измерения, но по трассам, параллельным линиям рисок на поверхности.
8. Рассчитайте среднее арифметическое значение результатов измерений и занесите данные в таблицу протокола.
9. Сделать вывод о соответствии данных образцов требованиям ТИ (технической инструкции) по параметрам шероховатости. ТИ. представляется преподавателем.

Протокол измерений должен, представлен в следующем виде:

### ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

от « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Наименование продукции: \_\_\_\_\_

Требования к продукции: \_\_\_\_\_

Количество испытываемых проб: \_\_\_\_\_

Вид испытаний: \_\_\_\_\_

Наименование средства измерения: \_\_\_\_\_

Режим измерений: \_\_\_\_\_

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Образец	№ замера	Поперек		Вдоль	
		Ra, мкм	RPc, 1/см	Ra, мкм	RPc, 1/см
1	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	Среднее				
2	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	Среднее				

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пробы (образцы) \_\_\_\_\_,  
испытанные на соответствие требованиям \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ соответствуют (не соответствуют) требованиям

\_\_\_\_\_ ненужное зачеркнуть, указать шифры документов

Испытания провели: \_\_\_\_\_

## Лабораторная работа №2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРОФИЛОМЕТРА TR-200 ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДЛИННОВОЛНОВОЙ ГРАНИЦЫ ФИЛЬТРА ГАУСА

#### Цель работы:

- получить навыки подбора режима измерения шероховатости в соответствии с международными стандартами
- сделать выводы о параметре фильтра  $\lambda_c$  при измерении шероховатости на заданных образцах.

#### 2.1. Общие сведения

На рис.1.8 показана схема выделения **R** и **W** профилей из **P** профиля. Эта операция является самой главной при регистрации параметров микро топографии поверхности. Она осуществляется операцией свёртки **P** профиля со стандартной весовой функцией. Выполнение этой операции лучше проиллюстрировать на простом примере

##### 2.1.1. Операция свёртки

Выполнение этой операции лучше проиллюстрировать на простом примере. Пусть элемент профиля имеет ординаты  $z = [1, 2, 3, 1]$ , а коэффициенты весовой функции значения  $b = [-1, 2, -2]$ . На рис.2.1 графически поясняется, каким образом происходит операция свертки.

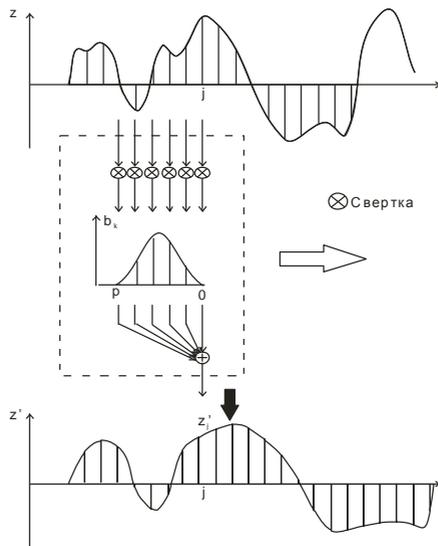


Рис. 2.1. Преобразование профиля при заданной весовой функции

В последнем столбце осуществлено деление на  $\sum_i |b_i|$ . Здесь профиль на входе в фильтр имеет ординаты  $z=[1,2,3,1]$ . Фильтр характеризуется весовой функцией  $b=[-1,2,-2]$ . Профиль на выходе из фильтра (модифицированный)  $z_m=[-0.2 \ 0 \ -0.2 \ 0.2 \ -2.5 \ -0.4]$ . Поэтому вектор значений  $z_m$  после свёртки обрезают с двух сторон, так чтобы он по длине соответствовал исходному вектору до свёртки. Для того чтобы определить ординату модифицированного профиля с индексом  $j$  необходимо использовать сегмент значений  $b$  и сегмент значений ординат исходного профиля. Умножая каждую ординату измеренного профиля на соответствующий весовой коэффициент, суммируя и усредняя эти произведения, получим значение одной ординаты модифицированного профиля. Теперь переходя к новому сегменту значений ординат измеренного профиля и сдвигая на один шаг всю «линейку» значений  $b(m)$  такой же операцией находим следующую ординату модифицированного профиля.

Таблица 2.1

Z(n)				1	2	3	1				$\Sigma \rightarrow$				Zm(k)		
b(m)	-2	2	-1	→													
		-2	2	-1	→								1·(-1)		-1/5		
			-2	2	-1	→							1·2	2·(-1)	0		
				-2	2	-1	→						1·(-2)	2·2	3·(-1)	-1/5	
					-2	2	-1	→						2·(-2)	3·2	1·(-1)	1/5
						-2	2	-1	→						3·(-2)	1·2	-4/5
							-2	2	-1	→						1·(-2)	-2/5
								-2	2	-1							

Операции свёртки очень похожа на бытовую ситуацию глаженья смятой ткани (синоним –профиль поверхности) горячим утюгом (синоним- весовая функция). Операция свёртки записывается как математическая операция  $z_m = b \otimes z$ , где значок  $\otimes$  является символ операции свёртки.

### 2.1.2. Фильтр Гаусса $\lambda c$ .

**Профильный фильтр Гаусса  $\lambda c$ [22,25]** является фильтром нижних пространственных частот с частотой среза  $1/\lambda c$ .

**Параметры фильтра:**  $\lambda c = 80; 250; 800; 2500; 8000$  мкм.

**Выполняемые операции:** выделение или устранение длинноволновой (или низкочастотной) составляющей профиля.

**Назначение фильтра  $\lambda c$ :**

Устраняет влияние формы неровностей большого масштаба с шаговыми параметрами соизмеримыми или более  $\lambda c$ , называемые неровностями волнистости.

**Весовые функции  $S(x)$  фильтра Гаусса  $\lambda c$**  строго стандартизована и имеет вид:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda c} \exp \left[ -\pi \left( \frac{x}{\alpha \lambda c} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

Соответствующие ей весовые коэффициенты выражаются как

$$b_k = \frac{1}{\alpha N_\lambda} \exp \left[ -\pi \left( \frac{k}{\alpha N_\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

где  $\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697$ ,

Пусть  $\lambda$  – протяженность неровности профиля. Следует обратить внимание (см. рис.2.2) на следующее обстоятельства:

1.в случае малых значений параметра  $\lambda c$  данный фильтр будет сглаживать только мелкие неровности профиля и не сглаживать большие неровности;

2.в случае больших  $\lambda c$  данный фильтр будет сглаживать и мелкие и крупные неровности профиля.

Но в любом из рассматриваемых случаев данный фильтр будет выявлять длинноволновую составляющую профиля, которую называют  $W$  профилем (волнистостью).Если её исключить из  $P$  профиля, то получим  $R$  профиль или профиль шероховатости. Необходимо сделать замечание о том, что профиль волнистости необязательно будет периодическим. Более того, при одном фильтре он может трактоваться как профиль волнистости, а при другом, как составляющая профиля шероховатости.

Следует обратить внимание на "ширину" весовых функций. Ширина весовой функции с  $\lambda_c$  примерно в 1000- раз уже весовой функции с  $\lambda_c$ . Также следует заметить, что профиль волнистости становится более ровным при увеличении параметра фильтра  $\lambda_c$ .

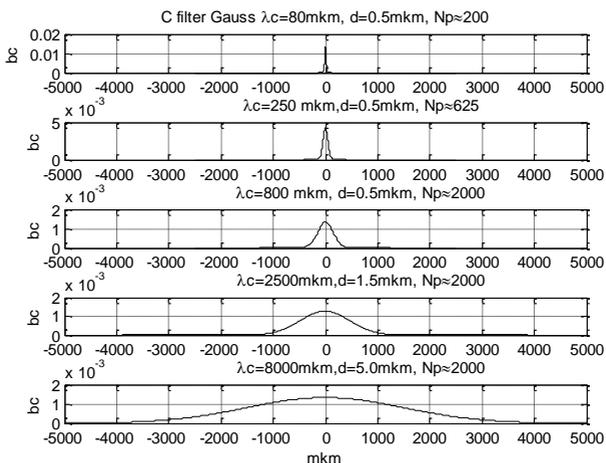


Рис. 2.2. Весовые функции профильного фильтра Гаусса с регламентированными значениями  $\lambda_c$ .

### 2.1.3. Операции выделения P,W,R профилей фильтром Гаусса с фиксированными значениями длинноволновой границы фильтра.

На рис 2.3 и 2.4 представлена операция выделения P,W,R профилей фильтрами Гаусса с различными стандартными параметрами фильтров. Наличие этих 5 фильтров(см. табл. 1.2) позволяет решать многие инженерные задачи, поскольку одно эксплуатационное или физическое свойство поверхности связано с высокочастотной составляющей профиля шероховатости, другое – с низкочастотной составляющей. Поэтому для инженера и исследователя важным является удачный выбор одного фильтра из пяти вышерассмотренных, который бы выделяет те микротопографические характеристики поверхности, которые имели бы наибольшую корреляционную связь с данным эксплуатационным свойством.

Самое важное замечание:

**Представление параметров микротопографии поверхности  
без указания значения параметра фильтра  $\lambda_c$   
- вопиющая инженерная безграмотность.**

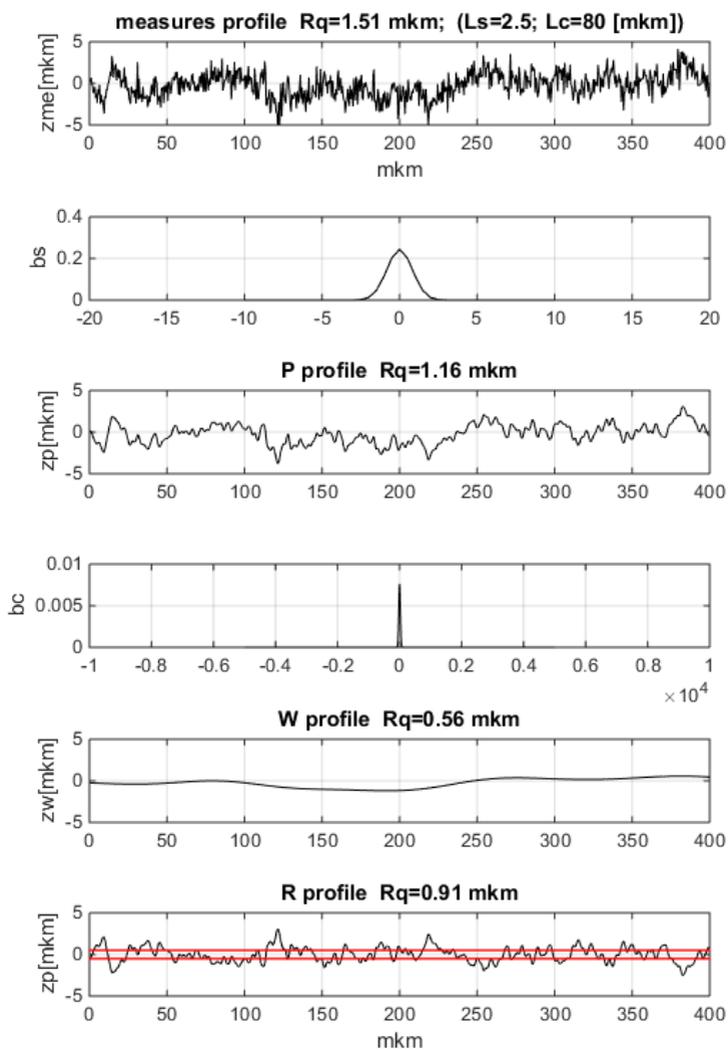


Рис.2.3. Операции выделения **P,W,R** профилей фильтрами Гаусса с параметрами  $\lambda s=2.5$  мкм,  $\lambda c=80$  мкм,  $d=0.5$  мкм

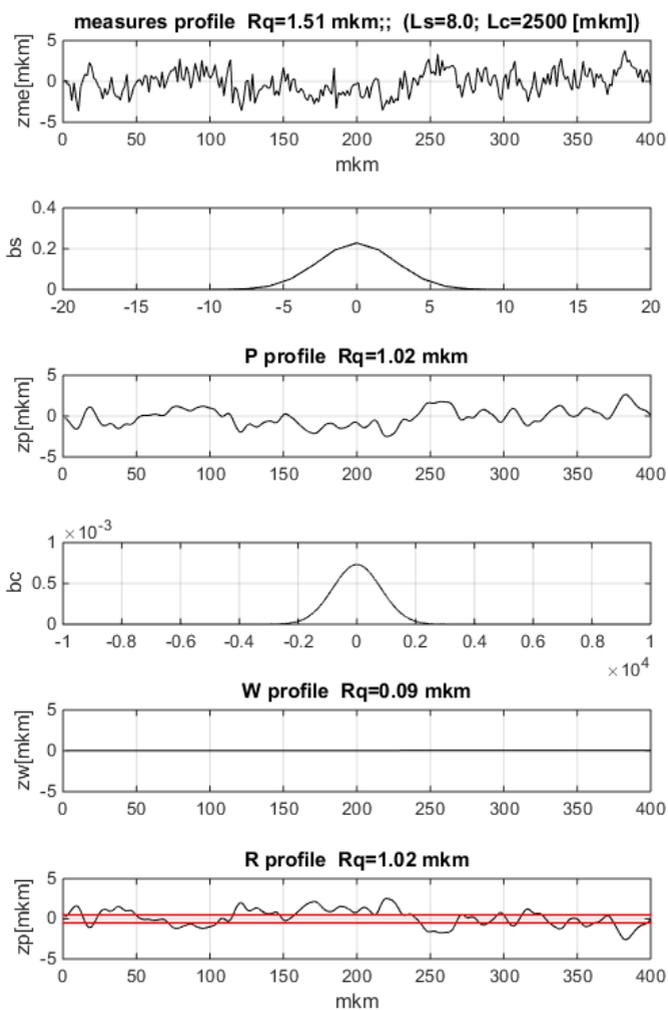


Рис.2.4. Операции выделения **P,W,R** профилей фильтрами Гаусса с параметрами  $\lambda_s=8.0$  мкм,  $\lambda_c=2500$  мкм,  $d=1.5$  мкм

## 2.2. Определение 2D параметров микрофотографии поверхности при выделении R профиля фильтром Гаусса с различными значениями длинноволновой границы фильтра шероховатости $\lambda_c$

**Цель:** Выявить влияния параметра фильтра Гаусса  $\lambda_c$  на измеряемые параметры  $R_a$  и  $R_{Sm}$ .

**Задание:** Подобрать параметр фильтра  $\lambda_c$  для измерения 2D параметров микрофотографии поверхности на двух заданных образцах. В качестве ТИ используется рекомендации стандарта ISO 4288 [28](таблица 2.2).

Таблица 2.2

$R_a$ , мкм	$R_{Sm}$ , мм	$\lambda_c$ , мм
$0.006 < R_a \leq 0.02$	$0.013 < R_{Sm} \leq 0.04$	0.08
$0.02 < R_a \leq 0.1$	$0.04 < R_{Sm} \leq 0.13$	0.25
$0.1 < R_a \leq 2$	$0.13 < R_{Sm} \leq 0.42$	0.8
$2 < R_a \leq 10$	$0.4 < R_{Sm} \leq 1.3$	2.5
$10 < R_a \leq 80$	$1.3 < R_{Sm} \leq 4$	8

## 2.3. Описание прибора TR 200

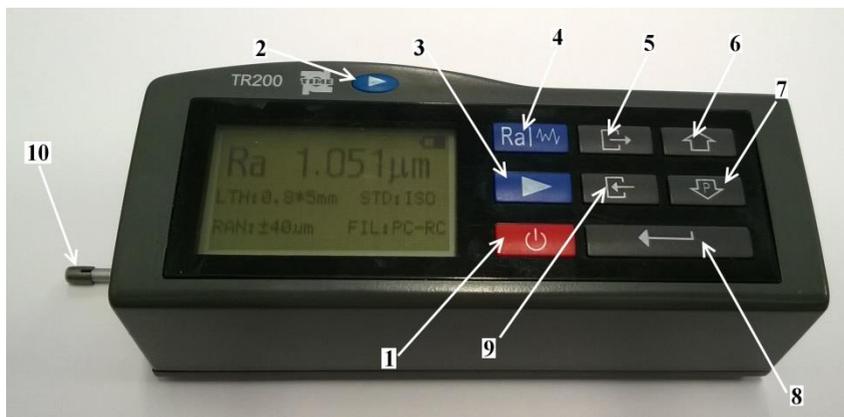


Рис.2.5. Внешний вид прибора для контроля шероховатости TR 200

1- кнопка включения и отключения прибора; 2,3 - кнопки старта измерения; 4 - кнопка выбора режима отображения; 5 - выход из меню настроек; 6,7 - кнопки перемещения по меню настроек измерения; 8 - кнопка подтверждения выбора настроек измерения; 9 - вход в меню настроек; 10 - измерительный шуп.

## 2.4. Порядок выполнения работы

1. Включить прибор нажатием клавиши «1» (см. рис. 2.5).
2. Войти в меню настроек прибора нажатием клавиши «9».
3. В появившемся окне (см. рис. 2.6) с помощью клавиш «6» и «7» выбрать раздел «CUTOFF/STD/FILT». Войти в него нажатием клавиши «8».
4. Устанавливаем значение отсечки шага нажатием клавиши «8». Для первого измерения выбираем значения «Cutoff» равное 0.25 мм. Остальные настройки оставляем без изменений.
5. Для выхода из меню нажмите клавишу «5».
6. Установите прибор на измеряемую поверхность. Направление перемещения щупа должно быть перпендикулярно линиям рисок на поверхности.
7. Для того чтобы запустить процесс измерения нажмите клавишу «3».
8. Все результаты измерения появятся на экране после нажатия клавиши «4». Перемещение по окну результатов осуществляется нажатием клавиш «6» или «7».
9. Осуществите 5 измерений в различных областях поверхности образца в заданном направлении. Полученные результаты занесите в таблицу протокола.
10. Осуществите аналогичные измерения на поверхности второго образца.
11. Рассчитайте средние значения параметров Ra и RSm.
12. Сравнивая эти данные с данными таблицы 2.2 сделайте рекомендации о параметре фильтра  $\lambda_s$ , который следует использовать при измерении шероховатости на данном образце. Заполните протокол измерений согласно представленному образцу.

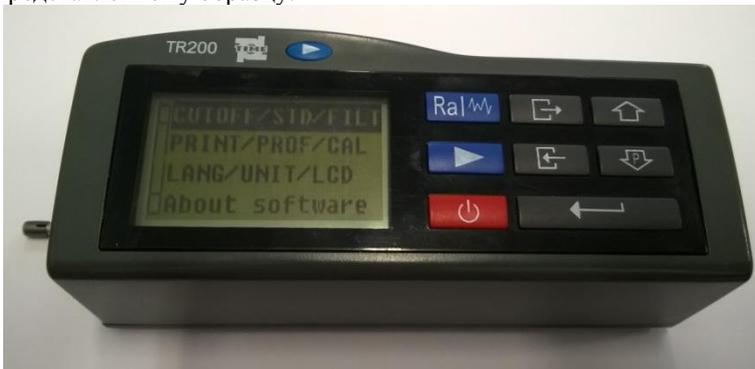


Рис. 2.6. Кнопки управления портативного профилметра TR200

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

от « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Наименование продукции: \_\_\_\_\_

Требования к продукции: \_\_\_\_\_

Количество испытываемых проб: \_\_\_\_\_

Вид испытаний: \_\_\_\_\_

Наименование средства измерения: \_\_\_\_\_

Режим измерений: \_\_\_\_\_

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Образец	№ замера	$\lambda_c=0.25\text{мм}$		$\lambda_c=0.8\text{мм}$		$\lambda_c=2.5\text{мм}$	
		Ra, мкм	RSm, мм	Ra, мкм	RSm, мм	Ra, мкм	RSm, мм
1	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	Среднее						
2	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	Среднее						

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения шероховатости на образцах \_\_\_\_\_, следует использовать фильтр Гаусса с параметрами  $\lambda_c =$  \_\_\_ мм, что соответствуют (не соответствуют) ТИ табл.2.2

Испытания провели: \_\_\_\_\_

### Лабораторная работа №3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С РАЗЛИЧНЫМ ВИДОМ ОБРАБОТКИ

#### Цель работы:

- получить навыки оценки оптимального числа измерений параметров шероховатости;
- дать рекомендации по числу измерений параметров шероховатости на заданных образцах заданным прибором.

#### 3.1. Общие сведения

Методики и способы оценки числа измерений  $N$ [2] должны прилагаться к профилометрам, поскольку у технологов всегда возникают следующие вопросы: 1) Какое количество измерений данного параметра шероховатости требуется делать на данном типе поверхности?; 2) Какова будет при этом погрешность определения этого параметра?

Эта информация необходима технологам для разработки условий поставки продукции с регламентируемой шероховатостью поверхности.

При измерении шероховатости реальных технологических поверхностей необходимо помнить, что однородных и изотропных поверхностей не существует. Поэтому часто результаты измерений амплитудных или частотных параметров по двум рядом расположенным трассам могут значительно отличаться.

При оценке вариации результатов измерения необходимо учитывать как вариацию результатов, обусловленную неоднородностью поверхности  $\delta_{\text{образца}}$ , так и вариацию, обусловленную методикой измерения и погрешностью измерения самого прибора  $\delta_{\text{прибора}}$ .

По правилу сложения дисперсий общую вариацию процесса измерения можно оценить как:

$$\delta^2 \approx \delta_{\text{прибора}}^2 + \delta_{\text{образца}}^2 \quad (3.1)$$

Число измерений будем искать из условия[2]

$$\delta_{\text{образца}} = 0.8 \cdot \delta_{\text{прибора}} \quad (3.2)$$

$\delta$  определим по вариации  $N$  замеров параметра «р»

$$\delta_{\text{образца}} = \frac{s_{\langle p \rangle}}{\langle p \rangle} 100\% = \frac{s_p}{\sqrt{N} \langle p \rangle} 100\% \quad (3.3)$$

Из формул (3.2) и (3.3) находим:

$$N = \left( \frac{S_p \cdot 100}{0.8 \cdot \langle p \rangle \cdot \delta_{\text{прибора}}} \right)^2 \quad (3.4)$$

где  $\langle p \rangle$  – среднее значение и  $S_p$  – среднее квадратическое отклонение можно определить по контрольной выборке:

$$\langle p \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} p_i}{N_B}, S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_B} (p_i - \langle p \rangle)^2}{N_B - 1}} \quad (3.5)$$

где  $N_B$  - объём контрольной выборки

Покажем пример оценки оптимального числа измерений для параметра  $R_a$ .  $\delta_{\text{прибора}}$  можно определить по паспортным характеристикам прибора (см. приложение). Например, многие портативные профилометры имеют погрешность определения амплитудных параметров равную 5%.

Пусть получены результаты измерений параметра  $R_a$  по 6 параллельным трассам  $R_a$ ,  $\mu\text{км} = [2.1; 2.1; 1.8; 1.9; 1.7; 1.9]$ .

Тогда  $\langle R_a \rangle = 1.9 \mu\text{км}$ ,  $S_{R_a} = 0.16 \mu\text{км}$ .

Оптимальное количество измерений можно оценить по формуле (3.4), а

количество измерений  $N = \left( \frac{0.16 \cdot 100}{0.8 \cdot 1.9 \cdot 5} \right)^2 \cong 4$ .

Аналогично можно оценить число измерений для других параметров шероховатости. Пользуясь подобными оценками можно для данного типа поверхности оценить минимальное число измерений, когда погрешность измерения шероховатости данной поверхности будет соизмерима с погрешностью профилометра по паспортным данным. Это очень важная информация для технологов, позволяющая определить оптимальное число измерений.

### 3.2. Порядок выполнения работы

1. Сделав контрольные измерения на двух заданных образцах, используя навыки выполнения лабораторных работ №1 и №2, выберете режим измерения параметров шероховатости на этих образцах.
2. Выясните из паспортных данных прибора погрешность определения параметров шероховатости.
3. Осуществите 10 измерений параметров шероховатости на каждом образце. Запишите данные в таблицу протокола и сделайте необходимые вычисления.
4. Оцените число измерений параметров  $R_a$  и  $R_{pC}$ , удовлетворяющее условию (3.2).
5. Внесите в протокол данные об режимах измерений, о  $\delta_{\text{прибора}}$ .
6. Сделайте рекомендации о количестве измерений на данном приборе для заданного образца. Заполните протокол измерений согласно представленному образцу.

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Наименование продукции: \_\_\_\_\_

Требования к продукции: \_\_\_\_\_

Количество испытываемых проб: \_\_\_\_\_

Вид испытаний: \_\_\_\_\_

Наименование средства измерения: \_\_\_\_\_

Погрешность измерения Ra, %: \_\_\_\_\_

Погрешность измерения Rрс, %: \_\_\_\_\_

Режим измерений: \_\_\_\_\_

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ замера	Образец 1		Образец 2	
	Ra, мкм	Rрс, 1/см	Ra, мкм	Rрс, 1/см
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
<p>				
$\sum_{i=1}^N (p_i - \langle p \rangle)^2$				
N				

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения шероховатости на образцах \_\_\_\_\_,  
прибором \_\_\_\_\_ следует осуществлять \_\_\_\_\_ измерений пара-  
метров Ra и Rрс

**Испытания провели:**

\_\_\_\_\_

**Лабораторная работа №4**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**  
**ПРОФИЛЕЙ ШЕРОХОВАТОСТИ С ПОМОЩЬЮ**  
**ПРОФИЛОМЕТРА MARSURF PS1 В СРЕДЕ MATLAB**

**Цель работы:**

- получить навыки определения функциональных характеристик профиля шероховатости;
- выявить отличия двух образцов шероховатой поверхности с близкими значениями параметров Ra и R<sub>c</sub>.

**4.1. Общие сведения**

По сравнению с выше рассмотренными параметрами шероховатости более эффективным является описание микротопографии поверхности с помощью функциональных характеристик. Чаще всего параметры шероховатости являются оценками этих функциональных характеристик.

Ниже будут рассмотрены следующие характеристики:

1. Дифференциальная функция распределения ординат профиля ADF и интегральная функция распределения ординат профиля BAC;
2. Автокорреляционная функция профиля - ACF;
3. Функция спектральной мощности профиля – PSD;
4. Зависимость числа пиков от уровня сечений профиля;
5. Фрактальные характеристики профиля.

***4.1.1. Дифференциальная функция распределения ординат профиля ADF и интегральная функция распределения ординат профиля BAC***

Очень хорошей оценкой ADF является гистограмма распределения ординат профиля, то есть распределение ординат по ячейкам столбцов гистограммы в зависимости от величины ординат. Эта операция очень напоминает сортировку разных по размерам гвоздей, когда гвозди каждого размера помещаются в своё ведро с меткой размера. Ведро обязательно необходимо ранжировать, то есть расположить их в ряд по возрастанию размеров гвоздей.

На рис.4.1 изображена гистограмма распределения ординат профиля. Эта гистограмма характеризуется четырьмя цифровыми оценками:

- 1) среднее значение, которое в нашем случае будет равно нулю, поскольку профиль шероховатости выделяется с помощью фильтров, которые исключают постоянную составляющую профиля;
- 2) R<sub>q</sub> – среднее квадратическое отклонение профиля, которое характеризует ширину гистограммы, то есть разброс значений ординат относительно нуля;
- 3) R<sub>sk</sub> - коэффициент асимметрии, который характеризует несимметричность гистограммы;

4)  $Rku$  – коэффициент эксцесса, то есть отличие гистограммы от гистограммы нормального распределения. Для нормального распределения  $Rku=3$ .

Также на рисунке 4.1 видны наибольшие высоты вершин профиля (параметр  $Rp \approx 3$  мкм), наибольшие глубины впадин профиля (параметр  $Rv \approx 3$  мкм), общая высота профиля  $Rt = Rp + Rv$ . Однако следует заметить, что эти параметры определяются для шероховатости с большой погрешностью. Они используются в том случае, если в профиле имеется достаточно большая детерминированная (часто гармоническая) составляющая.

Все эти разнообразные оценки прекрасно отображаются на одном графике ADF.

График ВАС можно получить из графика ADF последовательным сложением столбцов гистограммы. Так как высота столбцов гистограммы определяется числом ординат, попавшим по размерам в ячейку данного столбца отнесённых к общему числу ординат, то очевидно, что сумма столбцов гистограммы будет равна единице, то есть и максимальное значение ВАС будет также равно единице.

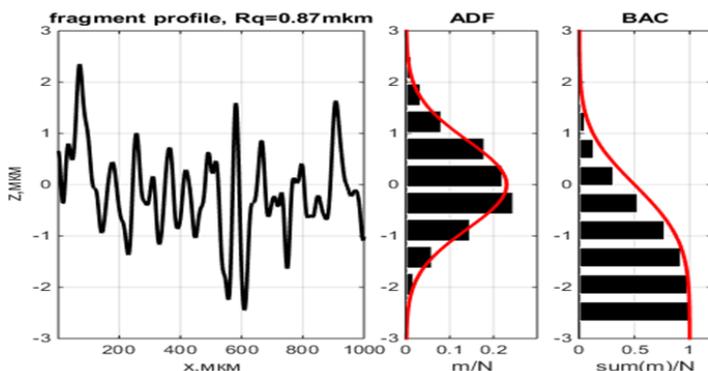


Рис.4.1. Графическое представление дифференциальной функции распределения ординат профиля ADF и интегральной функции распределения ординат профиля ВАС

Функции ADF и ВАС содержат абсолютно одинаковую информацию о профиле, однако они обе эффективно используются для характеристики профиля поверхности. Функция ADF, как было показано выше, прекрасно показывает и характеризует большое число амплитудных параметров профиля. Функция ВАС используется при определении поверхностных и объёмных характеристик профиля, при решении задач трибологии.

### 4.1.2. Автокорреляционная функция профиля - ACF

Автокорреляционная функция это результат операции свёртки профиля со своей точной копией. Операция свёртки рассмотрена в тексте лабораторной работы №2. Обозначим сдвиг этих профилей относительно друг друга  $\Delta x$ . Если сдвиг  $\Delta x$  будет равен нулю, то профили будут в точности накладываться друг на друга и будет происходить умножение положительных ординат на положительные, а отрицательных - на отрицательные. Среднее значение всех этих произведений будет равно квадрату параметра  $Rq$  [2]. При относительном сдвиге профилей произойдёт перемешивание положительных и отрицательных ординат и значение ACF резко уменьшится. Чтобы нормировать значения ACF производится деление её на  $Rq^2$ . Поэтому график  $ACF(\Delta x)$  начинается с единицы.

Чем более изрезан профиль, тем быстрее осуществляется спадание этого графика. Цифровой оценкой этого спада является параметр  $Sal$  – корреляционное расстояние, которое равно такому сдвигу  $\Delta x$ , когда ACF спадает в  $e \approx 2.7$  раз. На рис.4.2 этот параметр обозначен, как  $\tau$ . Этот параметр очень хорошо характеризует частотные характеристики профиля, если профиль похож на случайный процесс.

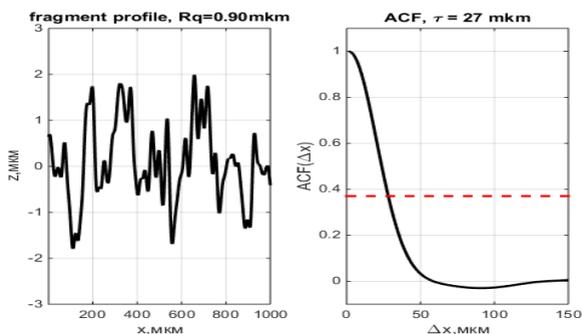


Рис.4.2. Графическое представление автокорреляционной функции профиля - ACF

### 4.1.3. Функция спектральной мощности профиля PSD

Эта функция используется в том случае, если имеются подозрения, что в профиле поверхности имеются детерминированные или гармонические составляющие. Обычно их присутствие объясняется вибрацией рабочего инструмента, либо импульсной лазерной обработкой. PSD – это квадрат Фурье - образа профиля. Известно, что частотное представление профиля после преобразования Фурье несёт ту же информацию, что и представление профиля в пространстве. Но переход в частотную область позволяет оценить спектральные характеристики профиля.

Спектр профиля позволяет выявлять гармонические составляющие, даже тогда, когда их амплитуды малы по сравнению с амплитудой случайной составляющей. Например, на рис.4.3 изображён график профиля, в котором не видно ни одной гармонической составляющей. Но график PSD достаточно уверенно обнаруживает две гармоники с пространственными частотами 0.056 (1/мкм) и 0.02 (1/мкм), то есть две волны с  $\lambda=18$  мкм и  $\lambda=50$  мкм. Например, подобные волны на шероховатой поверхности листа визуально не видны, но при покраске, когда устраняется случайная составляющая, они проявляются и могут служить браковочным критерием.

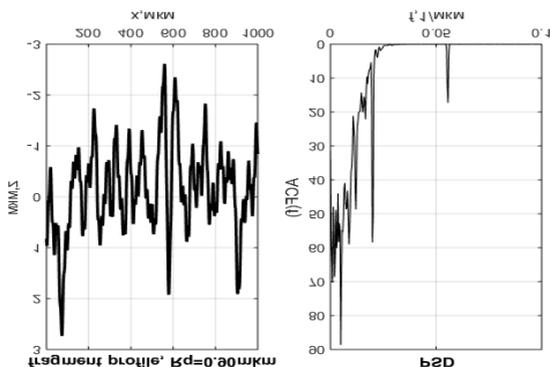


Рис.4.3. Графическое представление функции спектральной мощности профиля PSD

#### 4.1.4. Зависимость числа пиков $R_c$ от уровня сечений профиля $c$

В общем случае, когда в профиле существуют и случайные, и гармонические составляющие, когда на поверхности встречаются риски и точечные дефекты, для оценки частотных характеристик профиля используют достаточно грубый, но эффективный приём – определение зависимости числа пиков  $R_c$  от уровня сечений профиля  $c$ .

Операции вычисления числа пиков осуществляется по следующему алгоритму. Вначале проводятся две линии уровня, параллельные средней линии профиля сверху и снизу от средней линии профиля на одинаковом расстоянии  $\pm c$ . Затем определяется число пиков. Пиком считается неровность, которая имеет рядом расположенные части профиля выше и ниже заданных уровней. На рис.4.4 справа приведён график зависимости  $R_c(c)$ . Этот график также имеет цифровую оценку –  $R_{Pc}$  – число пиков, выходящих за уровни  $\pm 0.5$  мкм. Данный трактовка параметра  $R_{Pc}$  используют при регламентации микро топографии поверхности автолиста [26,27].

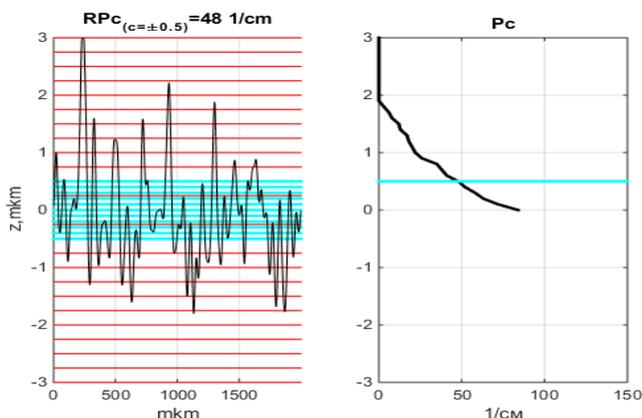


Рис.4.4. Графическое представление зависимости числа пиков  $Pc$  от уровня сечений профиля

#### 4.1.5. Фрактальные характеристики профиля

Было замечено, что мелкие неровности профиля реальных поверхностей подобны более крупным неровностям. Это подобие наблюдается только в определённых масштабах профиля. Оказалось, что профили, в которых преобладает случайная составляющая, различаются по параметру, называемому фрактальной размерностью  $Dls$ .

Один из алгоритмов определения  $Dls$  заключается в следующем. Вначале фиксируется достаточно длинный профиль с очень маленьким шагом дискретизации. После определяют длину профиля при этом шаге. Затем повторяют эти вычисления, но ординаты профиля уже определяются с шагом  $2d$ , то есть пропускаются значения каждой второй ординаты. Затем увеличивают шаг до  $3d$  и вновь определяют длины профиля. Увеличение шага делается до тех пор, пока линия профиля с большим шагом не станет практически параллельной средней линии. Затем строится классический график зависимости  $\log(L)$  от  $\log(\text{шаг})$ . Экспериментальные точки аппроксимируются прямой. Тангенс угла наклона этой прямой (см.рис.4.5) называют фрактальной размерностью  $Dls$  (length-scale fractal dimension). Так как реальные шероховатые поверхности имеют очень малые углы наклона микрограней, то фрактальная размерность  $Dls$  таких поверхностей близка к единице. Поэтому  $Dls$  часто заменяют на другой комплексный параметр  $Lsfc=1000 \cdot (Dls-1)$  - (length-scale fractal).

Отличия  $Dls$  или  $Lsfc$  от единицы и являются индивидуальной характеристикой различных шероховатых поверхностей.

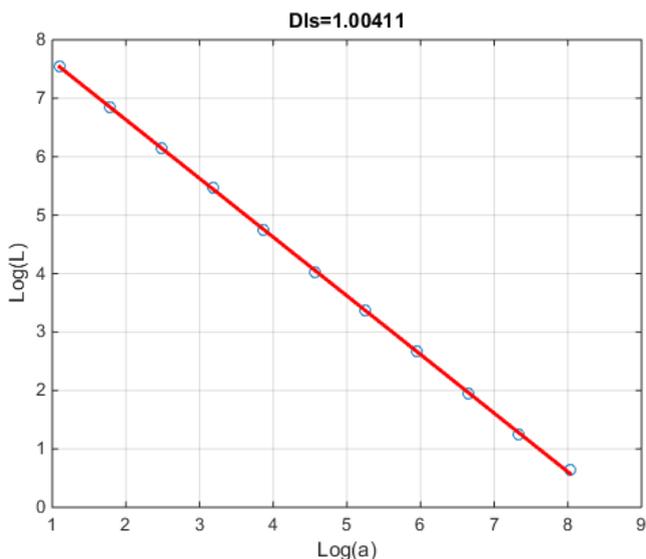


Рис.4.5. К определению фрактальной характеристики профиля Dls и определению параметра SRC

Имеется ещё один фрактальный параметр (smooth- rough crossover scale)- SRC, который указывает на границы определения параметра Dls. Он определяется по точке пересечения графика с уровнем значений  $\log(L)$ , равного единице. Например, на рис.4.5 это значение  $\log(a)=7.5$ , то есть  $a=1700$  мкм, то есть при  $0 < a < 1700$  мкм профиль шероховатости можно считать фрактальным объектом. При больших масштабах профиль уже будет считаться геометрическим объектом.

#### **4.2. Определение функциональных характеристик микротопографии поверхности**

**Задание:** Выявить отличия двух образцов шероховатой поверхности с близкими значениями параметров  $R_a$  и  $R_c$ .

Функциональные характеристики профилей определяются с помощью прибора MarSurf PS1 и программного продукта RO. Описание функциональных кнопок управления приведены на рис.4.6.

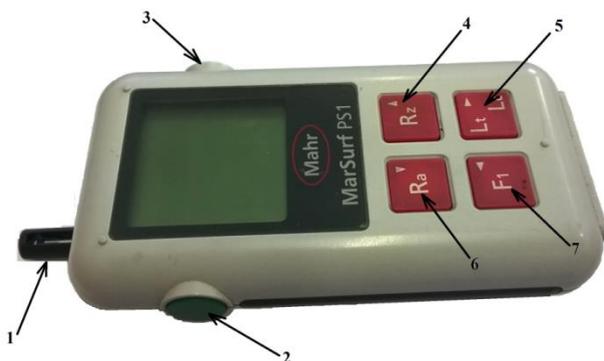


Рис. 4.6. Внешний вид прибора для контроля шероховатости MarSurf PS1

- 1– Измерительный щуп с защитным кожухом;
- 2– Кнопка включения прибора «Старт»;
- 3– Кнопка «Пуск» - запускает процесс измерения;
- 4– Кнопка «Rz» - выводит на экран значения параметра Rz, а также служит для перемещения по меню настроек;
- 5– Кнопка «Lt-Lc» - служит для выбора базовой длины, в меню настроек используется для выбора объекта;
- 6– Кнопка «Ra» - выводит на экран значения параметра Ra, а также служит для перемещения по меню настроек;
- 7– Кнопка «F1» выводит на экран значения параметра R<sub>Pc</sub>, а также служит для подтверждения выбора настроек измерения.

#### 4.3. Порядок выполнения работы

1. Включить прибор нажатием клавиши «Старт» (см. рис. 4.6) .
2. Одновременным нажатием клавиш «Старт» и «Lt-Lc» входим в меню настроек.
3. Нажатием клавиши «Rz» выбираем категорию «Профили», нажатием клавиши «Lt-Lc» входим её настройки.
4. Клавишей «Rz» выбираем раздел «Ошибка формата» повторное нажатие клавиши «Rz» активирует выбор формата текстового файла, устанавливаем «\*. txt». Подтверждаем выбор нажатием клавиши «F1».
5. Не выходя из категории «Профили» выбираем раздел «Запомнить». Нажатие клавиши «Lt-Lc» даст доступ к выбору включения записи профилей. Нажатием клавиши «Rz» выбираем «ВКЛ» и подтверждаем выбор нажатием клавиши «F1».
6. Выход из меню осуществляется двойным нажатием клавиши «F1»
7. Устанавливаем базовую длину нажатием клавиши «Lt-Lc».
8. Производим измерение нажатием клавиши «Пуск».

9. Не отключая прибор подключить к USB разъему компьютера. В меню «Мой компьютер» выбрать «MarSurf PS1». Далее выбрать папку «PROFILE» и скопировать имеющиеся файлы на компьютер.
10. Запустить программу «RO5.exe».
11. Сделать активным раздел «Загрузить профиль 2D», затем нажать клавишу «Загрузить 2D».
12. В появившемся окне установить следующие настройки (см. рис. 4.6):
  - «Профиль MAHR» - активно;
  - профиль сохранен в - «мм»;
  - «Срезать служебную информацию» - активно;
  - «Автоматически центровать профиль» - активно;
  - тип профиля – «шероховатости»;
  - значения базовой длины, мм – 0.08;0.25; 0.8; 2.5 (значения должны совпадать с пунктом п.7);
  - «Провести фильтрацию» - фильтром Гаусса.
13. Нажатием клавиши «Сохранить» мы активируем, клавиши «Пуск» для анализа профиля с помощью функций: «Стандартные характеристики», «Гистограмма», «Корреляционная функция», «Спектральная функция», «Фрактальная размерность и фазовый портрет» (см. рис.4.7).

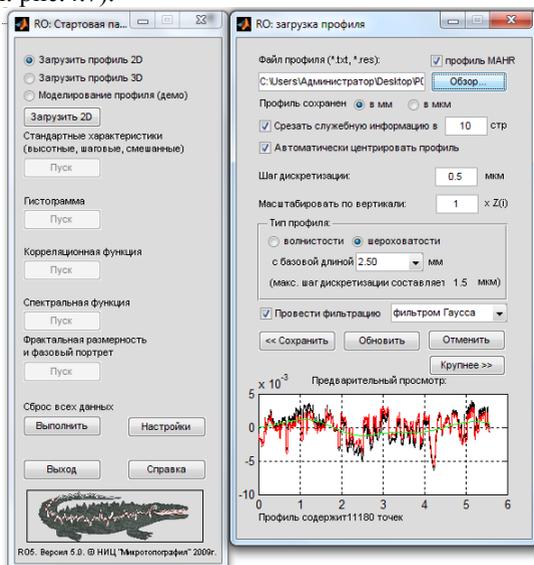


Рис. 4.7. Внешний вид стартового окна программы «RO»

14. Последовательно нажать клавиши «Пуск» для всех имеющихся функций.
15. Сохраняем получившиеся протоколы в виде картинок. Для этого заходим в меню «File» → «Save As.» → «Тип файла» → «JPEG image» → «Сохранить». Скопировать получившиеся картинки в Microsoft Word.
16. Перед анализом следующего профиля необходимо выполнить сброс всех данных нажатием клавиши «Выполнить».

Протокол измерений должен быть представлен в следующем виде:

### ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г. № \_\_\_\_\_

Наименование продукции: 1) \_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

Требования к продукции: \_\_\_\_\_

Количество испытываемых проб: \_\_\_\_\_

Вид испытаний: \_\_\_\_\_

Наименование средства измерения: \_\_\_\_\_

Погрешность измерения  $R_a$ , %: \_\_\_\_\_

Погрешность измерения  $R_p$ , %: \_\_\_\_\_

Режим измерений: \_\_\_\_\_

Дата проведения испытания: \_\_\_\_\_

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ замера	Образец 1		Образец 2	
	$R_a$ , мкм	$R_p$ , 1/см	$R_a$ , мкм	$R_p$ , 1/см
1				
2				
3				
средние				

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Два представленных образца имеют следующие отличительные признаки

1) \_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

3) \_\_\_\_\_

Два представленных образца не имеют существенных отличий по параметрам

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Испытания провели:**

\_\_\_\_\_

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов В. К. Профили поверхности. 3-е изд. - Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ. 2010 - 260 с.
2. Белов В.К. Метрологическая обработка результатов физического эксперимента. Учебное пособие. 4-е изд. - Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ. 2011 - 140 с
3. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Под ред. Н. А. Табачниковой. СПбю: Изд-во Политехн. ун-та.2007.138с.
4. Инженерия поверхности деталей. Колл. авт.: под ред. А. Г. Сулова. М. Машиностроение. 2008.-320с.
5. Белов В.К. Требования к микротопографии поверхности листовой продукции и возможности металлургической промышленности прошлое, настоящее, будущее. Часть 1. Требования заказчика и возможности технологии в настоящее время. 2D параметры микротопографии Бюллетень «Черная металлургия» 2015.№7.С.73 – 81.
6. Горбунов А.В., Яшин В.В., Антонов А.В., Жарков Е.В., Белов В.К., Пономарёва М.В. Особенности технологии производства листовой продукции для автомобильной промышленности с регламентированной микротопографией поверхности// Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". 2012. №4. С.89-93.
7. Белов В.К., Горбунов А.В., Папшев А.В., Жарков Е.В., Беглецов Д.О. Обеспечение регламентированной микротопографии поверхности горячеоцинкованного проката для видовых деталей автомобиля //Сталь. 2012. №2. С.55-58.
8. Белов В.К., Беглецов Д.О., Губарев Е.В., Денисов С.В., Дьякова М.В., Смирнов К.В. Особенности использования 3D топографических характеристик поверхности в инженерном деле Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова 2014. №1 (45) С. 73-80.
9. Белов В.К., Беглецов Д.О., Дьякова М.В., Горбунов А.В. Особенности производства листовой продукции с регламентированной микротопографией поверхности Сталь. 2014. №4. С.53-60.
10. В. Л. Мазур Научные основы технологии производства проката с заданной шероховатостью поверхности Сталь. № 5. 2015 .59-66с
11. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. — Долгопрудный : Издательский Дом "Интеллект", 2009. — 472 с.
12. Thomas T. R. Rough Surfaces. 2nd ed. — Imperial College Press, 1999. — 278 p.

13. X Jiang, P.J Scott, D.J Whitehouse и L Blunt: Paradigm shifts in surface metrology. Part I.Historical philosophy, //Proc. R. Soc. A 2007 463, 2049-2070;
14. X Jiang, P.J Scott, D.J Whitehouse and L Blunt Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift //Proc. R. Soc. A 2007 463,2071-2099
15. L. Blunt and Xiang Jiang, Advanced Techniques for Assessment Surface Topography, 1st edn, London Penton Press, 2003: General description of surface texture parameters.
16. Хусу А.П., Витенберг Ю.П. Пальнов В.А. Шероховатость поверхности. Теоретико-вероятностный подход. М. Наука, 1975. 343 с..
17. D.I. Whitehouse Surface geometry, miniaturization and metrology. //Phil. Trans.R.Soc.A(2012) 370,4042-4065
18. ANSI/ASME B46.1 -2009 Surface texture, surface roughness, waviness and lay. American National Standards Institute, Washington.
19. ISO 13565 - 1996 Geometrical product specification (GPS)—Surface texture: Profile method— International Organization for Standardization.
20. ISO 4287 - 2009 Geometrical product specification (GPS)—Surface texture: Profile method—International Organization of Standardization.
21. ISO/TS 16610-1 -2006 Geometrical product specification (GPS) Filtration. Part 1: Overview and basic concepts
22. ISO/TS 16610-20 -2006 Geometrical product specification (GPS) Filtration. Part 20: Linear profile filters: Basic concepts
23. ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS) Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.
24. ГОСТ 8.895-2015.ISO/TS 16610-1: Геометрические характеристики изделий (ГХИ) Фильтрация. Обзор и основные понятия.
25. ГОСТ Р ИСО 16610-21-2015 Геометрические характеристики изделий (ГХИ) Фильтрация. Линейные профильные фильтры. Фильтры Гаусса.
26. EN 10049-2013 Measurement of roughness average Ra and peak count R<sub>Pc</sub> on metallic flat products.
27. SEP 1940: Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzezahl P<sub>c</sub> an kaltgewalzten Flacherzeugnissen. VDEh, Dusseldorf.
28. ISO 4288-1996 Geometrical product specification (GPS)—Surface texture: Profile method. Rules and procedures for the assessment of surface texture
29. Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-K-15030-01-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 - 2015
30. ISO 1302:2002 Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

	Hommel Etamic W5, (Германия)	MarSurf PS1 (Германия)	TR 200 (Китай)
Измеряемые параметры шероховатости	Ra, R <sub>Pc</sub> , R <sub>z</sub> , R <sub>t</sub> , R <sub>q</sub> , R <sub>Sm</sub> , R <sub>p</sub> , R <sub>max</sub> , R <sub>3z</sub> , R <sub>pm</sub> , R <sub>pk</sub> , R <sub>k</sub> , R <sub>vk</sub> , Mr1, Mr2, A1, A2, R, R <sub>x</sub> , Ar, R <sub>z</sub> JIS, R <sub>mr</sub>	Ra, R <sub>q</sub> , R <sub>sk</sub> , R <sub>z</sub> , R <sub>Sm</sub> , R <sub>yJ</sub> , R <sub>zJ</sub> , R <sub>max</sub> , R <sub>p</sub> , R <sub>t</sub> , R <sub>p</sub> (ASME), R <sub>pm</sub> (ASME), R <sub>pk</sub> , R <sub>k</sub> , R <sub>vk</sub> , Mr1, Mr2, A1, A2, V <sub>o</sub> , R <sub>t</sub> , R <sub>3z</sub> , R <sub>Pc</sub> , R <sub>mr</sub> , S, CR, CF, CL, tp, R, Ar, R <sub>x</sub>	Ra, R <sub>q</sub> , R <sub>z</sub> , R <sub>Sm</sub> , R <sub>p</sub> , R <sub>v</sub> , R <sub>t</sub> , R <sub>S</sub> , R <sub>sk</sub> , R <sub>mr</sub> , tp, R <sub>y</sub>
Диапазон измерений, мкм	320	350	160
Разрешение, нм	5	8	10
Отсечка шага λс, мм	0.25/0.8/2.5	0.25/0.8/2.5	0.25/0.8/2.5
Фильтр	ISO 11562	ISO 11562	ISO 11562
Макс. длина трассы, мм	17.5	17.5	17.5
Радиус кривизны шупа, мкм	2	2	5
Предел допускаемой основной погрешности прибора по параметру R <sub>ад</sub> прибора, %	5	10	10
Класс точности по DIN 4772	1	3	3
Тип датчика	индуктивный	индуктивный	индуктивный

Примечание. Погрешности измерения параметров шероховатости [29] на приборах Hommel Etamic W5, MarSurf PS1, TR 200:

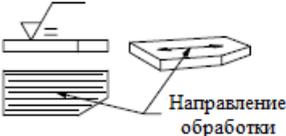
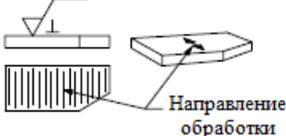
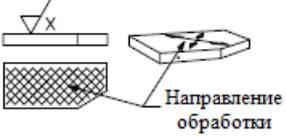
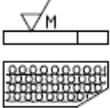
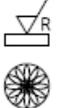
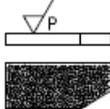
8% R<sub>a</sub> для 0.1 до 3.5 мкм

8% R<sub>z</sub> для 0.5 до 20 мкм

2 1/см для 25 ≤ R<sub>Pc</sub> ≤ 100 1/см

3 мкм R<sub>Sm</sub> для 40 до 400 мкм

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Графическое обозначение[30]	Направление измерения относительно направления обработки и примеры обозначения	
<b>=</b>	параллельное	
<b>⊥</b>	перпендикулярное	
<b>X</b>	перекрещивающиеся	
<b>M</b>	произвольное (случайное)	
<b>C</b>	кругообразное	
<b>R</b>	радиальное	
<b>P</b>	ненаправленное	



Учебное текстовое электронное издание

**Белов Валерий Константинович  
Губарев Евгений Владимирович**

**ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2D-ПАРАМЕТРОВ  
МИКРОТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ**

Практикум

1,74 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2017 год  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

Кафедра физики

Центр электронных образовательных ресурсов и  
дистанционных образовательных технологий

e-mail: ceor\_dot@mail.ru